Desenho e Projeto de Tubulação Industrial Nível II

Módulo V

Aula 02

1. Introdução

O projeto de tubulação é executado a partir de dados básicos estabelecidos durante as fases de pré-engenharia e projeto de um empreendimento industrial. A responsabilidade desta fase é do engenheiro especialista na disposição dos equipamentos e edifícios industriais que estabelece ao mesmo tempo as premissas básicas da tubulação e cronogramas de construção e instalação.

Neste módulo que é dividido em diversas apostilas, estudaremos o aspecto do cálculo das tubulações no que concerne ao dimensionamento dos tubos, perdas de pressão nos sistemas, suportação das tubulações, expansão e contração das tubulações e formas de evitar esforços nos vasos, etc. e as fórmulas usadas na hidráulica para o cálculo das tubulações. Nesta apostila abordaremos as formulas usadas para o cálculo dos tubos de forma genérica pois elas serão usadas praticamente nas outras apostilas de acordo com o fluido sendo transportado nas tubulações.

Esta apostila é dividida em duas partes: Parte A- Layouts e Parte B: Fórmulas. Na Parte A, do capítulo 2 até o capítulo 5 são estabelecidos, além dos layouts básicos, os fluxogramas de processo, os diagramas de processo e instrumentação chamados de diagramas P&I, os diagramas lógicos, especificações dos materiais, etc. Muitas vezes o projetista de tubulação é chamado para ajudar nestas tarefas. Na Parte B são estudadas as diversas fórmulas e premissas utilizadas nos cálculos das tubulações.

PARTE A- LAYOUTS

2. Filosofia básica

O primeiro passo no projeto de uma planta industrial é desenvolver o layout da planta que é a disposição dos equipamentos, edifícios, ruas, vias de tubos, tubulação aérea e enterrada, da tubulação geral de processo e os caminhos das bandejas de instrumentação e controle, e de eletricidade. Este trabalho é executado por projetistas especializados na distribuição dos equipamentos e demais partes de uma planta industrial.

O layout de cada planta industrial depende das especificações do cliente, dos prazos, das informações disponíveis e da filosofia do projetista.

Uma regra básica que deve ser lembrada ao projetar as tubulações é de evitar projetar uma linha por vez, ou seja, levar uma linha de um equipamento para outro antes de pensar na próxima linha. Apesar de assim também ser possível desenvolver um projeto, isto pode levar a uma falta de consistência no projeto.

Deve ser dada uma vista geral da tubulação em uma área antes de entrar no arranjo final da tubulação na área e isto pode ser feito por meio de uma revisão dos fluxogramas de tubulação e instrumentação (P&I) com vistas às tubulações principais para se assegurar de que as tubulações foram consideradas de uma forma correta.

Vamos considerar a instalação de dois vasos e dois permutadores em uma área em dois arranjos diferentes como vemos na Figura 2.1.

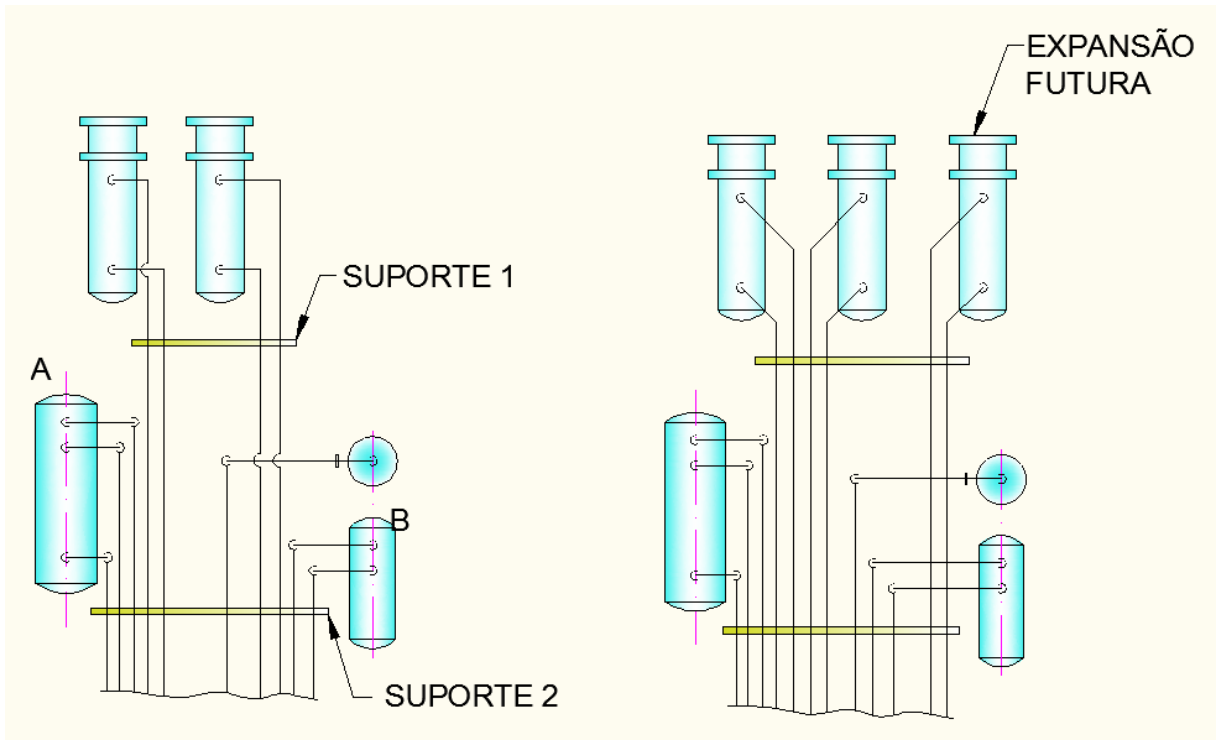



Figura 2.1

Ambos os arranjos são viáveis, mas vamos discutir alguns detalhes de ambos. O arranjo à esquerda não tem muita consistência e requer mais materiais para conexões e materiais de suporte dos tubos e seu arranjo pode complicar a expansão do sistema comparando com o arranjo à direita como vamos ver.

No arranjo à direita o Suporte 2 economiza na quantidade de peças para suportar a tubulação. Vemos que no Suporte 1 neste arranjo fica mais limpo na parte junto ao vaso com mais espaço para outros tubos. Também no caso de um aumento no número de permutadores de 2 para 3 ou mais, por exemplo, a tubulação a ser instalada tem mais espaço como vemos pelo detalhe à direita. Note que o espaço ocupado por ambos os layouts são idênticos.

Na Figura 2.2 temos uma vista de frente de uma instalação com um vaso vertical e um vaso horizontal com dois arranjos: (A) e (B).

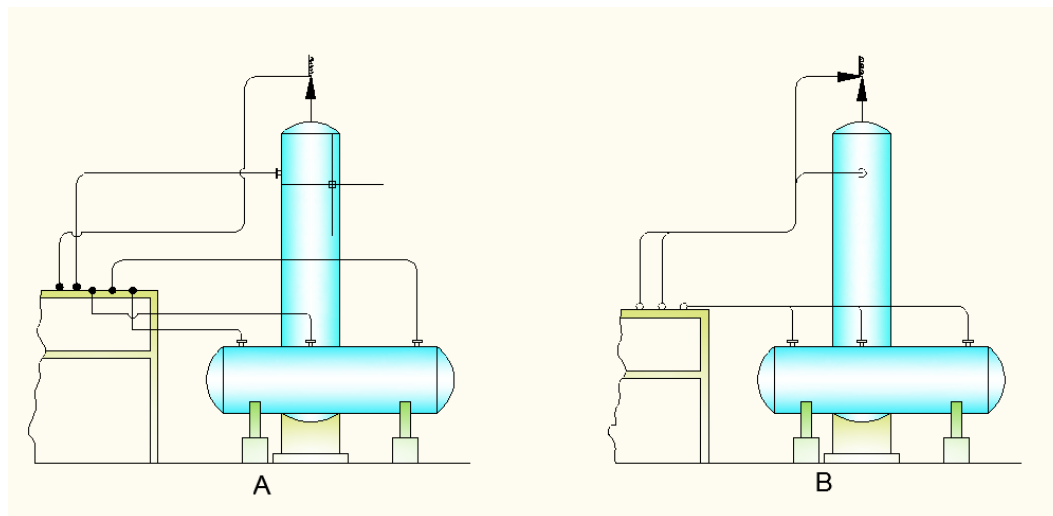



Figura 2.2

No arranjo (A) temos muitas elevações diferentes da tubulação que cruzam entre a ponte e os vasos. Isto obriga ao uso de mais conexões e suportes nas tubulações com o uso de diversos suportes em diferentes alturas e a utilização de mais materiais e manutenção mais difícil. Já no arranjo (B) temos menos elevações de travessia e isto simplifica os suportes e utiliza menos conexões nas tubulações.

Assim o projetista de tubulação deve ser cuidadoso na seleção do arranjo da tubulação para tornar a instalação mais econômica, mais fácil de manter e de operar, mesmo que não haja a necessidade de futura expansão do sistema.

Outro exemplo é no caso de tubulações inclinadas ou diagonais. Na Figura 2.3 vemos dois arranjos.

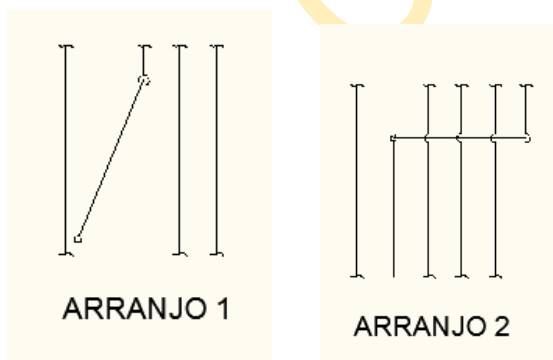



Figura 2.3

À esquerda no Arranjo 1 vemos a tubulação em diagonal no mesmo nível dos outros tubos. É evidente que esse tubo ocupa muito espaço e impede outros tubos de passarem por esse espaço sendo esta disposição aceitável somente se isto não bloquear a passagem de muitos tubos. Neste caso podemos instalar este tubo cruzando em outro nível como mostrado à direita no Arranjo 2 facilitando a instalação de outros tubos.

No caso dos barriletes que são conjuntos de tubos como vemos na Figura 2.4, existem layouts como o mostrado à esquerda que usam muitas conexões que

encarecem a instalação tanto no custo dos componentes como no custo da instalação com mais mão de obra para execução da tubulação.

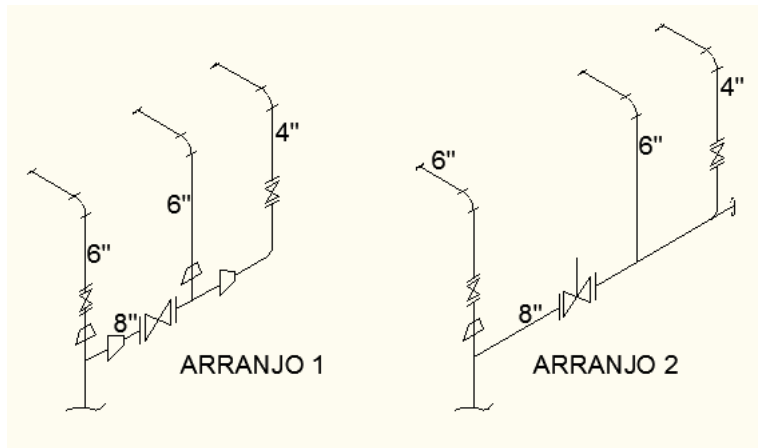



Figura 2.4

Neste caso vemos o uso de um tubo com os ramais soldados diretamente no tubo de diâmetro maior. Existem casos onde esta eliminação dos redutores não seja possível por razões das especificações, mas sempre que possível devemos usar esta opção.

Vamos discutir um último caso: o uso do espaço. Em muitos casos uma instalação se torna muito congestionada devido ao grande número de tubos ou ramais em um tubo como em certos barriletes.

Na Figura 2.5 vemos à esquerda a instalação de um purgador de vapor montado na linha horizontal ocupando um grande espaço que poderia bloquear uma passagem de operadores pelo local.

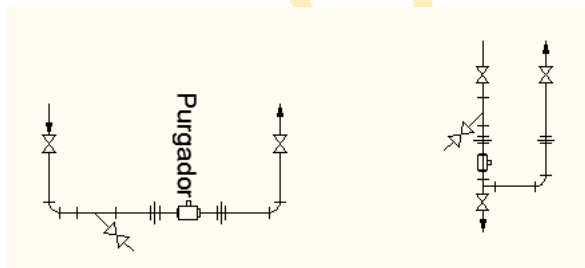



Figura 2.5

À direita nessa figura vemos uma instalação desse mesmo purgador na vertical usando menos espaço. No decorrer de nosso estudo vamos ver muitos tipos de arranjos de tubulações.

Tivemos assim uma idéia das possibilidades dos arranjos das tubulações. O projetista deve estar atento a essas alternativas de arranjo para escolher a que melhor se adapte nas condições para qual está trabalhando.

3. Padrões e terminologia

Já vimos os padrões ou normas e especificações aplicáveis às tubulações quando estudamos o Módulo II do Nível I de nosso curso, por isso não vamos repetir aqui essa matéria. Caso você queira poderá voltar ali para refrescar a memória.

Agora vamos ver os termos técnicos usuais que vão aparecer nesta parte de nosso estudo. O conhecimento destes termos ajudará na compreensão do assunto que vamos estudar.

Fluxograma: é o documento onde são mostrados os equipamentos principais de forma esquemática e as ligações das tubulações entre esses equipamentos. Ele é usado para a preparação dos layouts preliminares e plantas básicas (plot plans). São indicados os números dos equipamentos que são usualmente numerados de acordo com abreviações, siglas e números padronizados pela empresa que está fazendo a implantação ou pela empresa de engenharia que está fazendo o projeto. São indicados também os fluxos e temperaturas.

Diagramas de instrumentação e tubulação: São conhecidos como diagramas P&I (pronuncia-se PI and ai) que são as iniciais de Piping and Instrumentation (tubulação e instrumentação no inglês). Estes documentos mostram esquematicamente todos os equipamentos de processo, utilidades (água, vapor, etc.) e equipamentos auxiliares. Também são mostradas válvulas, conexões, instrumentação, isolamento e itens especiais assim como linhas de aquecimento em paralelo (tracing).

Lista de equipamentos: é uma lista contendo todos os equipamentos usados no projeto dando seu número de item, descrição e dados importantes. Pode ser feita pelo cliente ou pela empresa de engenharia. Nesta lista é usada a numeração padronizada dos equipamentos de que falamos no item fluxograma acima.

Especificação da tubulação: é um documento listando todos os materiais usados para as tubulações, válvulas e conexões para cada tipo de fluido usado no projeto. A listagem é baseada nas pressões, temperaturas e natureza do fluido se corrosivo ou outro tipo de ataque aos materiais, a espessura das paredes e códigos para armazenagem e especificação de compra.

Rota do tubo: é a linha que o tubo faz entre dois pontos de acordo com o projeto.

Desenho de estudo e layout: é um desenho ortográfico da tubulação. A palavra layout significa no inglês o arranjo geral da tubulação. Este documento não é enviado normalmente para o campo ou para o cliente sendo um desenho que mostra todos os equipamentos em uma determinada área e inclui as tubulações de processo e utilidades e válvulas e instrumentos principais de forma simplificada. São indicadas todas as localizações e elevações principais, escadas, plataformas e suportes da instalação indicando também dados que possam influenciar equipamentos ou estruturas ou outras disciplinas. Este desenho é a base para o detalhamento do projeto.

Traceamento com vapor: também conhecido como rastreio ou rastreamento. Muitos equipamentos e tubulações devem ser mantidos aquecidos por meio de um pequeno tubo de vapor, óleo quente ou uma resistência elétrica e isto é indicado no P&I. É o termo tracing no inglês.

Em linha: Este termo se refere a um instrumento ou componente instalado entre flanges na tubulação como um tubo de Venturi, por exemplo.

Válvulas de bloqueio: são válvulas que isolam ramais de tubos que não possuem acesso permanente ao pessoal de operação.

Ramal: é um tubo que sai de um tubo principal ou barrilete como vemos na Figura 3.1.

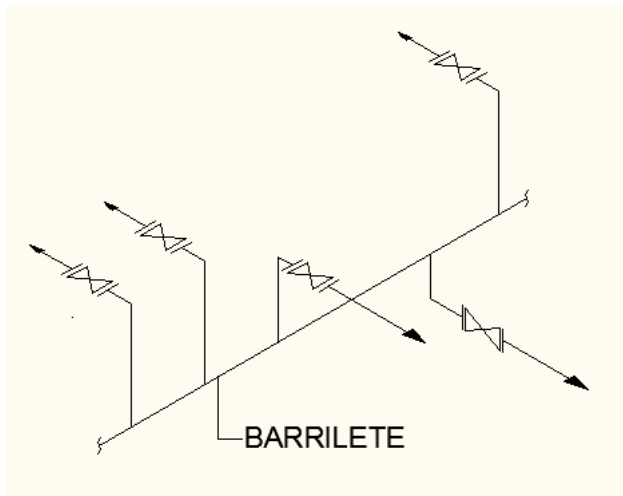



Figura 3.1

Cabeçote ou barrilete: é uma fonte primária de um fluido usado em outros equipamentos ou pontos do processo. Veja a figura 3.1.

Manutenção: é o trabalho rotineiro executado nos equipamentos e componentes para que eles estejam sempre nas melhores condições de trabalho e segurança. O projetista deve estar atento durante a execução do projeto de maneira a prover espaço adequado para os mecânicos e operadores de maneira que eles possam operar, consertar ou remover equipamentos sem a necessidade de remoção de partes que não estejam relacionadas com a parte em que se esteja trabalhando.

Operação: é a atenção que deve ser dada aos equipamentos, válvulas e instrumentos para que o processo decorra sem problemas e que o produto seja fabricado com segurança e tenha a qualidade final exigida. Estes componentes devem estar instalados de forma a serem operados sem dificuldades pelos operadores de campo.

Segurança: o layout deve ser estudado de maneira que o pessoal de operação e manutenção esteja livre de riscos ou perigos pessoais. O planejamento para segurança deve incluir as rotas de fuga no caso de acidentes e para o acesso aos equipamentos de combate ao fogo ao redor da unidade. O acesso para pessoal de combate ao fogo deve ser desimpedido. Os regulamentos e leis locais concernentes ao combate ao fogo devem ser obedecidos.

Flexibilidade: O arranjo das tubulações deve ser suficientemente flexível a fim de permitir o movimento de contração e expansão dos tubos devido às modificações de temperatura dos fluidos do processo e do meio ambiente. Deve ser notado que os esforços de contração ou expansão não devem ser de forma alguma serem transmitidos aos equipamentos. Este assunto será tratado em mais detalhe mais tarde no curso quando estudarmos a análise de fadiga e expansão.

Fluxo de gravidade: é quando devem ser evitadas bolsas de fluido nas tubulações e é indicado nos P&I com a notação “fluxo de gravidade”. Isto pode indicar a necessidade de instalação de equipamentos em locais mais altos. Veremos abaixo um exemplo deste problema na Figura 5.1.

Sistemas abertos: são sistemas em que seus conteúdos são descarregados sem serem recuperados. Um exemplo são as descargas de certos purgadores de vapor ou de válvulas de segurança ou de alívio.

Sistemas fechados: são sistemas em que o conteúdo descarregado por válvulas de alívio, válvulas de segurança ou purgadores de vapor deve ser recuperado.

Suportes de tubulação: são membros construídos normalmente de aço carbono que servem para suportar tubos de muitas formas e dimensões. Eles podem tomar muitas formas e dimensões e podem ser classificados como de sapatas, de molas e outros tipos como vamos estudar na última apostila deste curso, arranjo de pontes de tubos e suportes.

4. Plantas baixas básicas

Estes são desenhos preparados pelo engenheiro de projeto de layout durante o projeto preliminar sendo usado para localizar a infraestrutura e a localização dos equipamentos e serve para guiar as fases seguintes da engenharia de detalhamento e a construção.

Este é um dos documentos iniciais do projeto e é usado e consultado por praticamente por todos os grupos de trabalho. Este tipo de planta pode variar de uma fábrica para outra, pois depende da área disponível, da filosofia de manutenção e operação do proprietário, mas como muitos equipamentos são comuns como os permutadores, bombas, compressores, etc., é possível a aplicação de algumas regras básicas que servem para a maioria das plantas.

Não é do escopo deste curso o tratamento deste trabalho em detalhe e estas informações são dadas para permitir ao projetista de tubulação trabalhar junto ao projetista da implantação ajudando na disposição das tubulações e pontes de tubos principais no layout geral.

5. Fundamentos dos projetos de tubulação

Vamos agora ver alguns exemplos de tubulações que ajudarão o projetista na elaboração dos projetos de tubulação e comentá-los para orientação no trabalho de elaboração de projetos industriais.

Na Figura 5.1 vemos um P&I de um tanque cujo conteúdo deve fluir por gravidade para o tanque inferior, passando por um permutador de calor e indo para outro tanque em um nível inferior do qual o fluido é transferido por meio de uma bomba. Na figura superior está mostrado o diagrama P&I da instalação e mais abaixo dela dois layouts que são comentados a seguir.

P&I

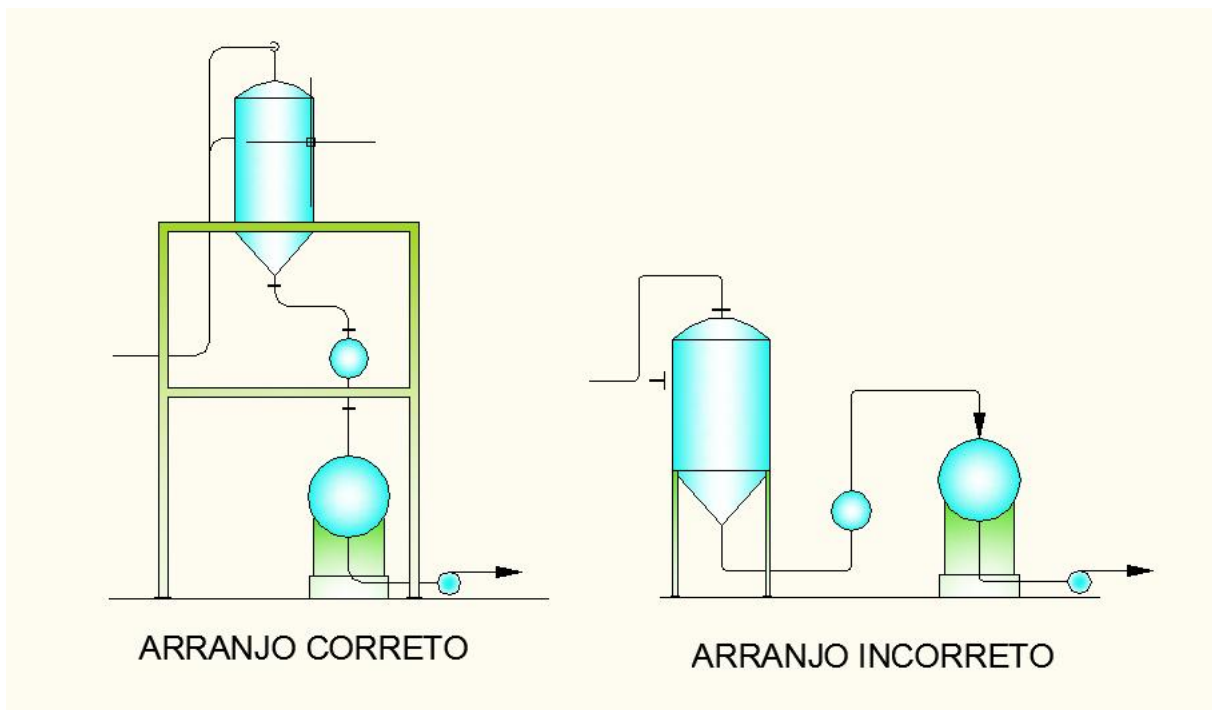
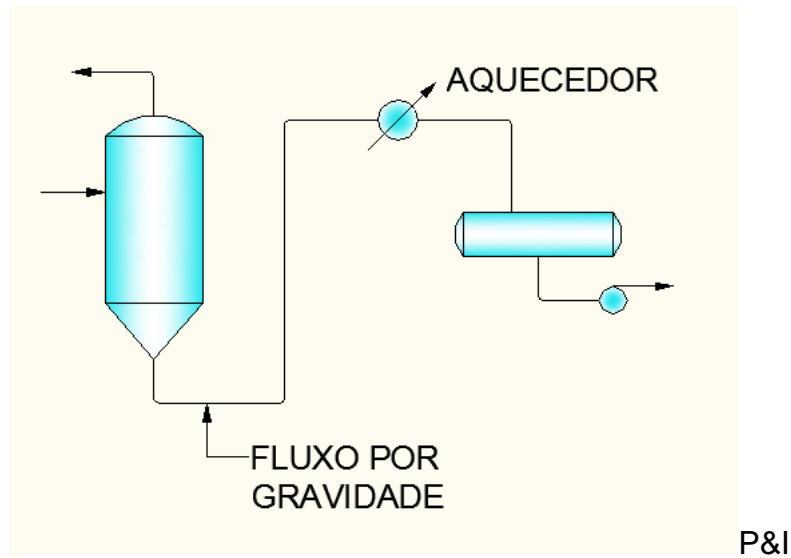



Figura 5.1

O layout da direita indica que existe uma bolsa de fluido antes do permutador onde parte do fluido fica presa antes do tanque de transferência. No layout da esquerda temos o tanque principal instalado sobre uma plataforma e o fluido pode correr pela tubulação sem formar bolsas onde o fluido pode ficar estagnado. Este é um exemplo de sistema por gravidade como está anotado no P&I.

Na Figura 5.2 temos à esquerda um layout da instalação de uma válvula de segurança que descarrega para a atmosfera e em linha tracejada a descarga da válvula vai para um tubo de recepção das descargas. Estão indicados nessa figura os arranjos de um sistema aberto e de um sistema fechado.

Nessa figura à direita temos um sistema onde o condensado pode fluir para o esgoto ou dreno em linha tracejada e em linha cheia o condensado pode fluir para

um tubo de recepção de condensado que o conduzirá para o tratamento de condensado.

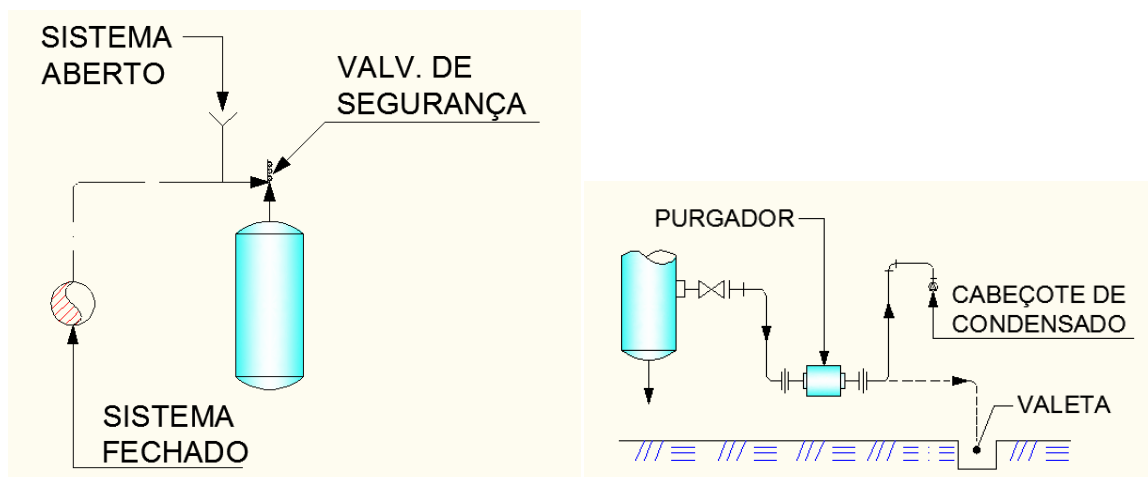



Figura 5.2

As linhas cheias desses arranjos indicam circuitos fechados e as linhas tracejadas mostram circuitos abertos. Sistemas abertos são sistemas cujo conteúdo da linha é descarregado e não é recuperado como o que vai para a valeta e sistemas fechados são os sistemas cujo conteúdo pode ser recuperado como o vapor condensado que pode voltar para o tratamento de condensado na caldeira.

Na Figura 5.3 vemos um trecho longo de tubulação de vapor que está sujeito à expansão devido ao aquecimento.

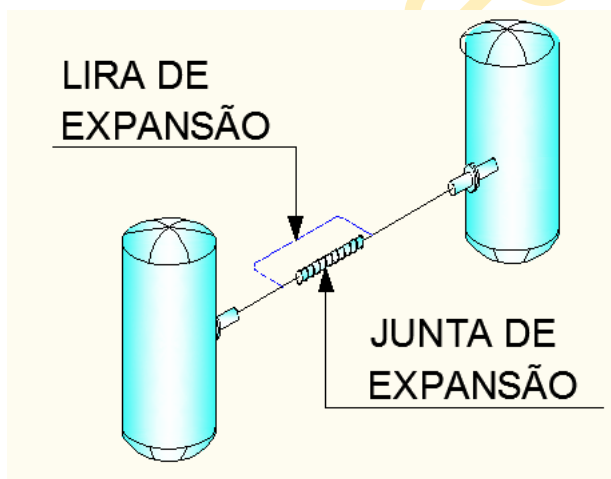



Figura 5.3

Neste caso deve ser usada alguma forma para permitir a expansão da tubulação sem que ela sofra tensões perigosas que possam levar a fraturas e sem que se transmitam ao equipamento podendo provocar explosões e acidentes. Vemos nessa figura algumas formas assinaladas tais como:

1. Instalação de lira de expansão.
2. Instalação de junta de expansão.

Outras formas de permitir a expansão da tubulação seria a modificação da posição do equipamento permitindo curvas para expansão ou redução da espessura do tubo, se isto for possível do ponto de vista da pressão de trabalho.

Cabe ao projetista de tubulações escolher a alternativa mais segura junto com o engenheiro responsável pelas estruturas e equipamentos.

Os suportes das tubulações são da máxima importância e devem ser escolhidos de forma criteriosa. Suas formas e dimensões podem ser muito variadas dependendo das aplicações e eles devem suportar os tubos de forma a não permitir sua movimentação ou, quando necessário, para permitir certos movimentos em uma direção ou em qualquer direção quando necessário para expansão por exemplo.

Vamos ver algumas aplicações de suportes iniciando com uma tubulação isolada termicamente, Figura 5.4.

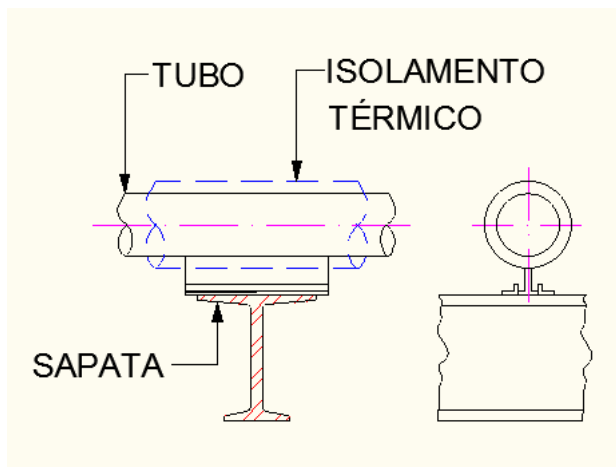



Figura 5.4

Nesta tubulação está sendo usado um suporte de sapata fabricado com um ferro T e guiado por cantoneiras.

Na Figura 5.5 vemos um suporte de tubos com molas.

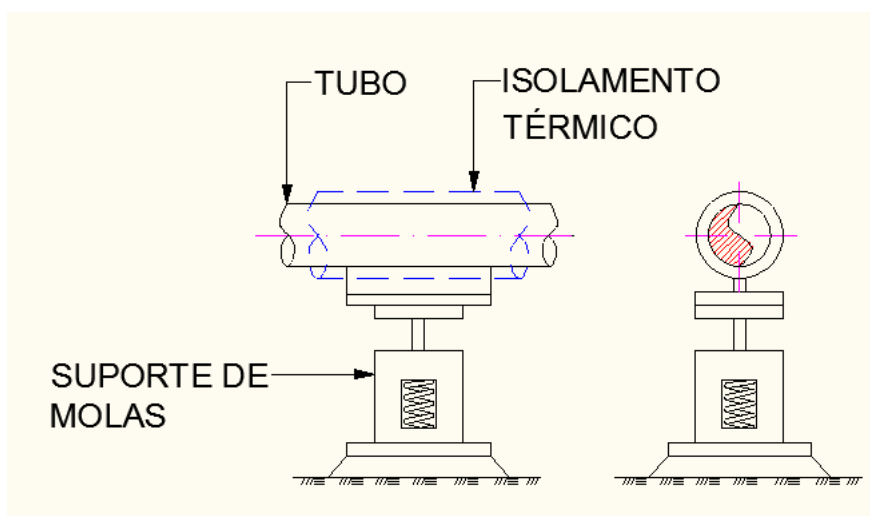



Figura 5.5

Este suporte permite a movimentação do tubo na direção mostrada pelas setas e é aplicado em tubulações aquecidas que podem sofrer dilatação ou contração.

Vamos ver muito mais sobre este assunto na última apostila do curso que trata das análises de tensões.

PARTE B- FÓRMULAS

6. Fórmulas de hidráulica

Nesta parte da apostila de estudo básico de tubulação estão cobertas as fórmulas usadas no cálculo das tubulações para líquidos e gases com fluxo constante para as aplicações industriais variadas. Neste estudo discutiremos os princípios básicos dos fluidos em geral e as fórmulas usadas nos cálculos de escoamento dos fluidos em geral. Esta será a base para o estudo do escoamento dos fluidos específicos que faremos em apostilas dedicadas a cada um deles como escoamento de água, vapor, gás, etc.

6.1. Características e fórmulas comuns a diversos fluidos

Vamos inicialmente estudar certas características e fórmulas que são comuns e aplicáveis a diversos fluidos. Algumas vezes estas aplicações têm alguma diferença com o fluido usado e nestes casos estas diferenças são discutidas quando o fluido em questão for estudado nas apostilas específicas.

Neste estudo serão muito citados os sistemas de medidas. No nosso país é usado o Sistema Internacional de Unidades cuja sigla é SI que é o antigo Sistema Métrico. Nos Estados Unidos o sistema de medidas usado é o U. S. Customary System of Units (Sistema comum americano de unidades) cuja sigla é USCS. Usaremos essas siglas no curso. Deve-se notar que na indústria petroquímica são usadas muitas unidades do sistema USCS e por isso este sistema é também mostrado no estudo do escoamento dos fluidos.

No Apêndice I desta apostila são mostradas as conversões das unidades desses sistemas de medidas, assim como um breve resumo de ambos.

6.2. Massa e peso

A massa de um corpo é definida por sua quantidade de matéria e é medida no sistema USCS em slugs e no sistema SI em quilogramas, kg. Uma certa massa de gás, por exemplo, ocupará um certo volume que depende de sua temperatura e pressão. Por exemplo, uma massa de água pode estar contida em um tanque de 20 m^3 a 20°C e 10 kPa. A água assim como a maioria dos líquidos é praticamente incompressível e a pressão tem pouco efeito sobre seu volume, porém os gases como o ar, por exemplo, são muito afetados pela pressão. Mas pelo princípio da conservação das massas certa quantidade de matéria permanece constante a todas as pressões e temperaturas.

O peso de um corpo é definido como a força gravitacional que é exercida sobre ele em uma dada localidade e por isso o peso de um corpo varia de acordo com o local onde ele esteja. Pela segunda lei de Newton podemos calcular o peso de um corpo que é sua massa multiplicada pela aceleração da gravidade no local onde ele está. Podemos escrever a equação:

$$P = mg \quad \text{(F1)}$$

Nessa equação:

P= peso do corpo, lb no sistema USCS e g no SI
M= massa do corpo, slug no sistema USCS e kg ou N no SI
g= aceleração da gravidade, ft/s^2 no USCS e m/s^2 no SI

6.3. Densidade e peso específico

Define-se densidade como a massa de um corpo por unidade de volume desse corpo. No sistema USCS é definido pela unidade $slug/ft^3$ e no sistema SI por kg/m^3. Então a água tem uma densidade de 1000 kg por m^3 na temperatura ambiente.

O peso específico de uma substância é também chamado de densidade do peso e é definido como o peso de um corpo por unidade de volume. Já vimos na fórmula F1 a relação entre o peso e a massa de um corpo e podemos então escrever a equação seguinte:

$$\gamma = \rho g \text{(F2)}$$

Nesta fórmula temos:

γ = peso específico, lb/ft^3 no USCS e N/m^3
ρ = densidade, $slug/ft^3$ no USCS e kg/m^3 no SI
g = aceleração da gravidade, ft/s^2 no USCS e m/s^2 no SI

Exemplo 6.1. Um tanque tem uma capacidade de 10 m^3 e contém água a uma temperatura de 20°C (ambiente) Assumindo que sua densidade é de 990 kg/m^3, calcular o peso de água no tanque assumindo que g=9,81 m/s2 no local.

Solução. Massa de água: volume x densidade= 10*990=9900 kg

Peso de água: massa x *g*= 9900*9,81= 97119 N

6.4. Gravidade específica

A gravidade específica é também conhecida como densidade relativa e é a razão da densidade de um corpo relativa à densidade de um material de referência, geralmente a água cuja densidade é por definição 1,00. Já vimos acima a definição de densidade.

6.5. Viscosidade

Viscosidade é a medida da resistência que um corpo oferece ao fluxo. No caso dos líquidos que escorrem por um tubo cada camada desse líquido exerce certo atrito com a camada adjacente como vemos na Figura 6.1 na figura central.

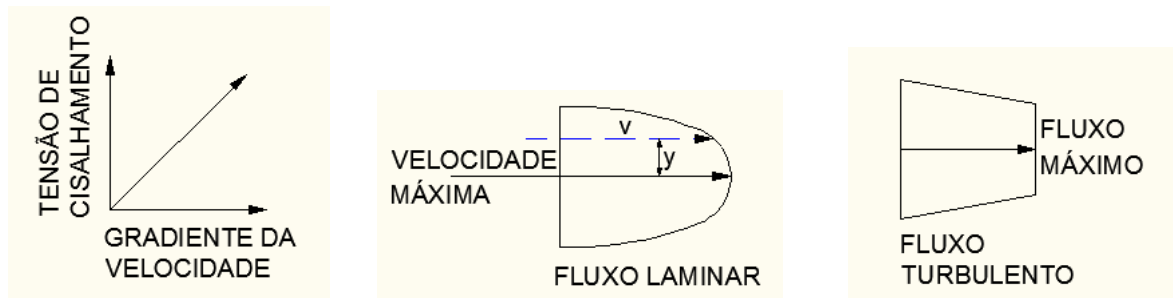



Figura 6.1

Estudaremos esta propriedade com mais detalhe nas apostilas de cada fluido que vamos estudar neste curso.

6.6. Pressão

Pressão é definida como a força exercida em uma unidade de área. Conforme a lei de Pascal quando o fluido for a água ou fluidos incompressíveis a pressão é transmitida em todos os sentidos como vimos em nosso estudo da mecânica dos líquidos. No sistema SI de medidas as unidades são o N/m^2 ou o pascal Pa. No fim desta apostila no Apêndice I está uma tabela de conversão de unidades. No sistema USCS a unidade é a lb/in^2 ou libras por polegada quadrada.

A equação geral para a pressão de um líquido com uma profundidade h e com peso específico γ é:

$$P = \gamma h \quad \text{(F3)}$$

A variável γ pode ser substituída por ϱg sendo ϱ a densidade e g a aceleração da gravidade.

Geralmente as tubulações trabalham a pressões mais altas que a atmosférica que são chamadas de pressões manométricas. A pressão absoluta é a soma da pressão atmosférica e pressão manométrica e é dada pela equação:

$$P_a = P_m + P_{man} \quad \text{(F4)}$$

No cálculo das bombas principalmente a pressão do líquido é chamada de pressão da altura e no SI é dada em metros (m) e em pés (ft) no sistema USCS.

De forma geral podemos escrever para a água a equação:

$P = \frac{h*S_g}{0,102}$ (F5) para o SI, onde P é a pressão em *kPa*, *h* é a altura em metros e *Sg* é a a gravidade específica da água e

$P = \frac{h*S_g}{2,31}$ (F6) para o sistema americano, onde *P* é a pressão em psi, *h* é a altura em pés e *Sg* a gravidade específica da água.

Vamos fazer um exemplo de aplicação mostrando a diferença entre os dois sistemas de medidas.

Exemplo 6.1: Calcular a pressão em psi de uma coluna de água de 200 *ft* assumindo o peso específico de 62,4 lb/ft^3 para a água. Mostrar o equivalente em kPa .

Resposta: Usando a equação F3 temos, no sistema USCS:

$P = 62{,}4 * 200 = 12480 lb/ft^2$ ou $\frac{12480}{144} = 86{,}67 psig$

O *g* de psig nessa fórmula indica gauge no inglês ou manômetro e tem o nome de pressão manométrica.

A pressão absoluta será de: 86,67+14,7=101,37 *psia*.

Neste caso o *a* indica pressão absoluta.

No sistema SI:

Na tabela de equivalência vemos que 1 pé=0,3048 m e 200 pés valem então: 200*0,3048=60,96 m. A densidade da água é de 1000 kg/m^3 e usando a F5 temos:

$$P = \frac{60{,}96 * 1000}{0{,}102} = 597{,}64\ kPa$$

Pela tabela de equivalência do Apêndice I temos que 0,145 é igual a 1 kPa, então 597,64 kPa serão equivalentes a $597{,}64 * 0{,}145 = 86{,}65\ psi$ o que confirma nosso cálculo.

Este exercício é interessante para você aprender também a usar a tabela de equivalência do Apêndice I.

6.7. Velocidade

A velocidade de fluxo em uma tubulação depende da dimensão do tubo e da taxa de fluxo. Se o fluxo for uniforme a velocidade em cada secção transversal do tubo será constante, mas existe uma variação da velocidade na secção transversal como veremos em detalhe abaixo no estudo da viscosidade. Assim podemos definir uma velocidade média que é a razão entre o taxa de fluxo e a área de fluxo:

$$Velocidade = \frac{Taxa\ de\ fluxo}{Área\ de\ fluxo}$$

Se considerarmos um tubo redondo de diâmetro interno *D* e uma taxa de fluxo *Q* sua velocidade média será dada pela equação:

$$V = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4}} \text{ (F7)}$$

No sistema USCS o fluxo é indicado em ft^3/s e cada pé tem 12 polegadas. Um pé quadrado tem 12x12=144 polegadas quadradas e podemos então modificar a equação acima para ter o fluxo em ft^3/s, a velocidade em *ft/s* e o diâmetro indicado em polegadas como segue:

$$V = \frac{144Q}{\pi D^2/4} = 183{,}3461 \frac{Q}{D^2} \text{ (F8)}$$

Ou modificar para usar a velocidade em ft/s, o fluxo em gpm e o diâmetro interno em polegadas ficando então:

$$V = 0{,}4085\,\frac{Q}{D^2}\ \text{(F9)}$$

No sistema SI onde a velocidade é dada em *m/s*, o fluxo em m^3/h e o diâmetro do tubo em *mm* temos:

$$V = 353{,}6777\,\frac{Q}{D^2}\ \text{(F10)}$$

Exemplo 2.2. Temos um fluxo de água de 2000 gpm (galões por minuto) por um tubo de 16 in ou 16 polegadas internas. Calcular a velocidade média em fluxo constante em *ft/s* e *m/s*.

Resposta: No sistema USCS:

$$V = 0{,}4085\,\frac{2000}{16^2} = 3{,}19f/s$$

Para usar a fórmula para o sistema SI devemos converter as quantidades dadas no sistema USCS para o SI. Usando a tabela do Apêndice I vemos que 1 gal=3,785 litros e uma polegada ou 1 in é igual a 25,4 mm. Então temos:

$$Q = \frac{2000 * 3{,}785 * 60}{2000} = 454{,}2\,m^3/h$$

e

$$D = 16 * 25{,}4 = 406{,}4mm$$

Com esses dados podemos usar a F8:

$$V = 353{,}6777\,\frac{454{,}2}{406{,}4^2} = 0{,}97m/s$$

Ora como vemos no Apêndice I: 1 f/s=0,3048 m/s então:

3,19*0,3048=0,97 m/s e os resultados coincidem o que era esperado.

Assim você aprendeu a fazer diversas conversões de medidas entre o sistema USCS e o SI.

Vamos agora iniciar o estudo das fórmulas usadas nos cálculos hidráulicos.

7. Fórmulas para os cálculos hidráulicos

Vamos iniciar agora o estudo das fórmulas usadas nos cálculos hidráulicos que são básicas para praticamente todos os fluidos. Nesta apostilas essas fórmulas são apresentadas de forma genérica e quando estudarmos cada fluido nós veremos a aplicação destas fórmulas com mais detalhe.

7.1. Número de Reynolds

O número de Reynolds ou coeficiente de Reynolds é um número adimensional, isto é, sem dimensões físicas usado para o cálculo de fluxo. Ele depende do diâmetro do tubo, da taxa de fluxo, da viscosidade do líquido e de sua densidade. Ele pode ser calculado pela seguinte equação:

$$R = \frac{VD\rho}{\mu} \text{ (F11)}$$

Nessa fórmula temos:

R= Número de Reynolds, sem dimensão
V= Velocidade
D= Diâmetro interno do tubo
ρ = Massa específica do fluido
μ = Viscosidade dinâmica do fluido

Devemos observar que como *R* é adimensional deve ser usado com um conjunto consistente de unidades para todos os itens da fórmula para ficar seguro que as unidades se cancelam e *R* fica sem dimensões.

Existem outras fórmulas para o cálculo desse número, como por exemplo, para o sistema USCS:

$$R = 3162{,}5\frac{Q}{D\nu} \text{ (F12)}$$

Nessa fórmula temos:

R= Adimensional
Q= Fluxo em gpm
D= Diâmetro interno do tubo, in (polegadas)
ν= Viscosidade cinemática, cSt

E para o sistema SI:

$$R = 353.678\frac{Q}{D\nu} \text{ (F13)}$$

Onde:

V= Velocidade em m/s
Q= Vazão em m^3/h
D= Diâmetro interno em mm
ν= Viscosidade cinemática cSt

Exemplo 7.1. Uma tubulação de 22 in (polegadas) de diâmetro interno transporta 8000 galões por minuto de água. Calcular a velocidade média e o número de Reynolds tomando uma viscosidade de 1,0 cSt. Calcular o valor para o sistema USCS e SI.

Resposta: Para o USCS vamos usar a fórmula F9 para a vazão e F12 para o número de Reynolds. Então:

$$V = 0{,}4085\frac{Q}{D^2} = 0{,}4085\frac{8000}{22^2} = 6{,}75\ ft/s$$

$$R = 3162{,}5\frac{Q}{D\nu} = 3162{,}5\frac{8000}{22 * 1} = 1150$$

Para o SI usaremos F10 para a velocidade e F13 para *R*:

8000 gpm=8000*3,785*60/1000 que são iguais a 1816,8 m^3/h e 22*25,4=558,8 mm de diâmetro.

$$V = 353{,}6777\frac{Q}{D^2} = 353{,}6777\frac{1816{,}8}{558{,}8^2} = 2{,}06m/s$$

Para o número de Reynolds teremos:

$$R = 353{,}678\frac{1816{,}8}{1 * 558{,}8} = 1149{,}89$$

Vemos que o número de Reynolds é o mesmo como poderíamos prever (a pequena diferença 1110 para 1149,89) se deve a arredondamento dos números nos cálculos.

7.2. Tipos de fluxo

O fluxo pelas tubulações pode ser classificado em:

- Fluxo laminar quando $R \leq$2100
- Fluxo crítico 2100< $R \leq 4000$
- Fluxo turbulento quando $R > 4000$

Como vemos o fluxo é laminar quando o número de Reynolds está abaixo de 2100, entre 2100 e 4000 ele toma o nome de fluxo crítico ou transitório pois quando o fluxo está entre esses valores o fluxo é indefinido do ponto de vista da perda de pressão e acima de 4000 o fluxo toma a forma de turbulento.

O fluxo laminar se caracteriza por ser suave sem torvelinhos ou turbulências visíveis e pode ser visto como um fluxo em lâminas ou camadas. Se injetarmos um corante no líquido nós veremos linhas coloridas definidas.

Já o fluxo turbulento ocorre a velocidades mais altas e vem acompanhado por torvelinhos e outros distúrbios no corpo de fluido.

7.3. Fator de atrito

No cálculo das tubulações vamos estudar uma equação geral de fluxo onde entram dois fatores: fator de transmissão e o fator de atrito de Darcy. Este fator que anotamos com a letra f é calculado, na zona de fluxo laminar pela equação:

$$f = \frac{64}{R} \text{(F14)}$$

Vimos que conforme o valor do número de Reynolds temos os diversos tipos de fluxo. Veremos mais sobre este assunto em 7.7.4 abaixo quando estudaremos o diagrama de Moody.

7.4. Perdas de pressão devidas ao atrito

Como já vimos conforme um fluido como a água escoa por um tubo existe um atrito entre as diversas camadas do fluido e entre das moléculas desse fluido e a parede interna do tubo. Este atrito causa uma perda de energia que se converte de energia de pressão e cinética em energia térmica ou calor. Esta pressão como vimos no estudo das bombas diminui continuamente do ponto de entrada para o de saída do tubo e esta perda de pressão toma também o nome de perda de altura devida ao

atrito. Ela depende da taxa de fluxo, das propriedades do fluido, do diâmetro do tubo, de sua rugosidade interna e de seu comprimento.

Para melhor compreensão deste assunto vamos ver diversas equações da dinâmica dos fluidos. Este estudo vai ajudar na compreensão da perda de pressão por atrito nas tubulações. Os exercícios de aplicação dessas fórmulas serão dados quando estudarmos cada um dos tipos de fluidos.

7.4.1. Equação de Bernouille

A equação de Bernouille é uma forma de apresentação do princípio da conservação da energia quando aplicada a uma tubulação. Ao longo de um tubo a energia total do fluido é calculada computando a energia do líquido devido à pressão a que está submetido, velocidade e elevação com referência a certo ponto. Este cálculo é combinado com a entrada, saída e perdas de energia do sistema sendo esta energia constante em cada ponto.

Na Figura 7.1 vemos a representação simbólica de um tubo que vai do ponto inicial A ao ponto B. Assumimos o seguinte:

Ponto	Z	P	V
A	Z_a	P_a	V_a
B	Z_b	P_b	V_b

Estes dados são referenciados ao nível N de referência.

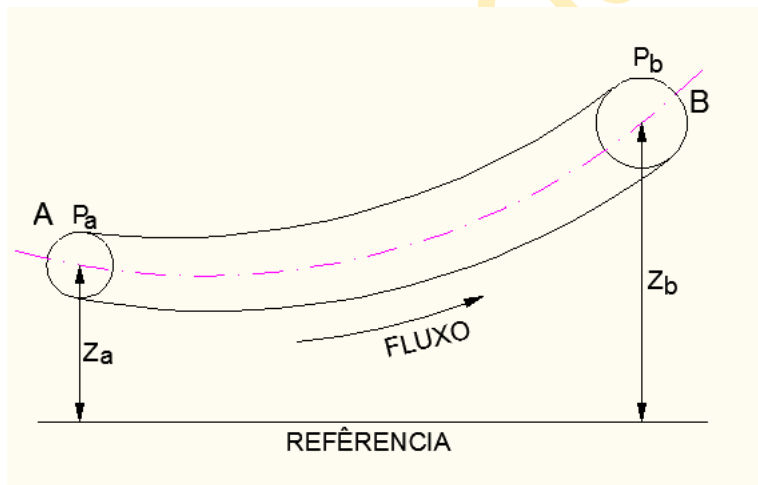



Figura 7.1

Uma partícula do fluido de peso unitário no ponto A possui a energia total *Ea* que tem três componentes, sendo γ o peso específico do fluido:

Energia potencial: Z_a

Energia de pressão: $\frac{P_a}{\gamma}$

Energia cinética: $\frac{V_a^2}{2g}$

Assim podemos calcular a energia total como a soma dessas energias parciais:

$$E = Z_a + \frac{P_a}{\gamma} + \frac{V_a^2}{2g} \text{ (F15)}$$

Todos os termos têm uma distância como dimensão e a energia no ponto A tem uma dimensão em metros ou pés que podemos indicar como H_a e H_b que podemos escrever como:

Ponto A: $H_a = Z_a + \frac{P_a}{\gamma} + \frac{V_a^2}{2g}$ (F16)

Ponto B: $H_b = Z_b + \frac{P_b}{\gamma} + \frac{V_b^2}{2g}$ (F17)

Pelo princípio da conservação de energia podemos escrever:

$$H_a = H_b \text{ (F18)}$$

Então temos enfim: $Z_a + \frac{P_a}{\gamma} + \frac{V_a^2}{2g} = Z_b + \frac{P_b}{\gamma} + \frac{V_b^2}{2g}$ (F19)

Esta é a equação de Bernouille. Mas note que não consideramos nesta equação a energia inserida no sistema por uma bomba, por exemplo, ou retirada ou perdas no sistema como as perdas por atrito, por exemplo. Chamando H_p a energia adicionada por uma bomba e h_f a energia perdida por atrito teremos a forma comum usual dessa equação:

$$Z_a + \frac{P_a}{\gamma} + \frac{V_a^2}{2g} + H_p = Z_b + \frac{P_b}{\gamma} + \frac{V_b^2}{2g} + h_f \text{ (F20)}$$

Vamos agora estudar as perdas no sistema, h_f, devido ao atrito começando pela equação de Darcy. Estas perdas variam com as condições do fluxo nas tubulações e do tipo de fluido.

7.4.2. Equação de Darcy-Weisbach

Esta equação foi desenvolvida por meio de pesquisas que duraram pelo menos dois séculos e é atualmente a mais precisa e usada para o cálculo do fluxo de fluidos em encanamentos. Ela é também conhecida como equação de Darcy, e pode ser usada para o cálculo de tubos que transportam qualquer tipo de fluidos líquidos e gasosos. Nós veremos sua aplicação mais tarde ao estudar cada um dos fluidos usados comumente na indústria.

Conforme o fluido passa da secção A para a secção B a pressão cai em virtude da perda de pressão como já vimos. A equação de Darcy pode ser usada para calcular a perda de pressão e essa equação tem a seguinte forma:

$$h = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} \text{ (F21)}$$

Nesta equação os símbolos significam:

h: perda de pressão por atrito, pés
f: Fator de atrito Darcy, adimensional
L: Comprimento da tubulação, pés
D: Diâmetro interno do tubo, pés
V: Velocidade média do fluido, pés/s
g: aceleração da gravidade, ft/s^2

A aceleração da gravidade em unidades SI vale $g = 9{,}81 m/s^2$ e no sistema USCS vale $g = 32{,}2 ft/s^2$.

Veja que o valor das perdas é dado em comprimentos, mas pode ser convertido para perdas em psi ou kPa usando fórmulas dadas em 6.6 acima como a F(6) que dá as perdas em psi.

O termo $v^2/2g$ na equação de Darcy é chamado de altura de velocidade e representa a energia cinética do fluido. Esse termo será utilizado quando for discutida a perda de pressão de atrito nas conexões e válvulas.

Outra forma da equação de Darcy com as perdas por atrito indicadas em psi/mi (psi por milha) e usando a taxa de fluxo no lugar da velocidade é:

$$P_m = 71{,}16 \frac{fQ^2}{D^5} \text{(F22)}$$

Nessa fórmula temos:

P_m : é a perda por atrito em psi/milha
f: Fator de atrito sem dimensão
Q: taxa de fluxo, gal/min
D: diâmetro interno do tubo em polegadas

Nas unidades do sistema SI essa fórmula pode ser escrita assim:

$$P_{km} = (6{,}2475 * 10^{10}) \frac{fQ^2}{D^5} \text{ (F23)}$$

Nessa equação temos os seguintes valores:

P_{km}: perda de pressão devida ao atrito em metros de coluna de fluido em kPa/km.
Q: taxa de fluxo em m^3/h.
f: Fator de atrito Darcy sem dimensão.
D: diâmetro interno do tubo em mm.

Para calcular a perda por atrito devemos ter o coeficiente de atrito ou fator de atrito f, pois é o único fator desconhecido da equação. Este fator é adimensional e tem um valor entre 0,0 e 0,1 e para um fluxo turbulento seu valor é geralmente de 0,02. Ele depende da rugosidade da parede interna do tubo, do diâmetro do tubo, do número de Reynolds, e do tipo de fluxo, se laminar ou turbulento.

Para um fluxo laminar f pode ser calculado pela equação:

$$f = \frac{64}{R} \text{ (F24)}$$

Onde *R* é o número de Reynolds para o fluxo laminar que pode ser menor do que 2100 e supondo que temos um número *R* de 1200 o fator f seria de 64/1200=0,0533. Se uma tubulação que tem 300 mm de diâmetro interno e um fluxo de água de 350 m3/h a perda em um quilômetro dessa tubulação seria de:

$$P_{km} = 6{,}2475 * 10^{10} * 0{,}0533 * \frac{350^2}{300^5} = 167{,}87\ kPa$$

Devemos observar que se o fluxo for turbulento onde $R > 4000$ o fator de atrito não é tão certo como o obtido com o fluxo laminar. No próximo capítulo vamos ver uma fórmula usada para esse tipo de fluxo.

7.4.3. Equação de Colebrook-White

Estudamos a equação de Darcy para o cálculo da perda de pressão por atrito em uma tubulação que é a mais utilizada hoje em dia. Mas o fator de atrito f foi sempre difícil de ser determinado no caso de fluxo turbulento. Ao redor de 1939 foi estabelecida finalmente uma lei empírica para o fator de atrito baseada em um trabalho de Moody, Colebrook-White e outros pesquisadores que ficou conhecida como equação de Colebrook-White e é usada para o cálculo do fator de atrito para regime turbulento. Esta é uma equação que combina resultados experimentais do estudo do fluxo turbulento em tubos lisos e rugosos.

Essa equação tem a seguinte forma:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log_{10}\left(\frac{e}{3{,}7D} + \frac{2{,}51}{R\sqrt{f}}\right) \text{(F25)}$$

Nesta equação temos:

f = fator de atrito de Darcy sem dimensão
D = diâmetro interno do tubo, polegadas ou mm
e = rugosidade absoluta da parede do tubo, polegadas ou mm
R = número de Reynolds, sem dimensão

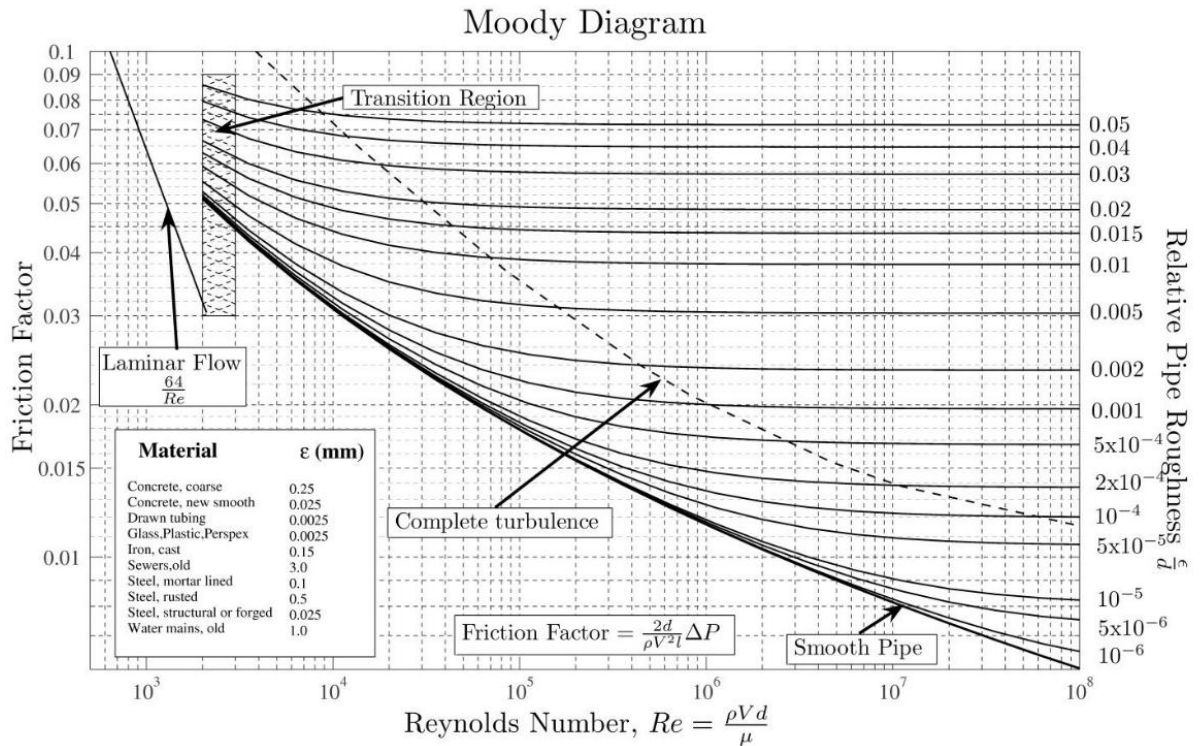
Esta equação tem sido considerada ser mais precisa que a de Darcy, mas devido a que o fator f estar presente em ambos os lados da equação sua resolução necessita um processo iterativo de tentativa e erro e foram desenvolvidas diversas equações para evitar este processo. Não vamos entrar nas considerações dessas equações neste curso e usaremos somente a equação dada acima.

A rugosidade e depende das condições da superfície interna do tubo e tem um valor entre 0,05 mm ou 0,002 polegadas para a maioria dos cálculos.

Na tabela T1 abaixo estão listados alguns valores típicos para a rugosidade dos tubos.

T1		
Rugosidade interna dos tubos		
Material do tubo	Rugosidade	
	Polegadas	mm
Aço rebitado	0,035-0,35	0,9-9,0
Aço comercial	0,0018	0,045
Ferro fundido	0,010	0,26
Aço galvanizado	0,006	0,15
Ferro fundido asfaltado	0,0047	0,12
Ferro forjado	0,0018	0,045
PVC, vidro	0,000059	0,0015
Concreto	0,018-0,118	0,3-3,0

7.4.4. Diagrama de Moody

O diagrama de Moody é um gráfico que relaciona o fator de atrito, o número de Reynolds e a rugosidade relativa da parede interna do tubo para o fluxo de um fluido em um tubo circular, para todos os regimes de fluxo: laminar, crítico ou turbulento. Neste diagrama podemos obter os números de Reynolds e vários valores para a rugosidade relativa de um tubo e/D. Vemos este diagrama na figura abaixo.

Nós vamos ver a seguir o modo de determinação usando esse gráfico.

Para um dado número de Reynolds no eixo horizontal inferior, desenhamos uma linha vertical até atingir a curva que representa a rugosidade relativa e/D. O fator de atrito pode então ser lido indo em linha reta horizontal para o eixo vertical esquerdo (Friction factor= fator de atrito).

Podemos ver desse diagrama que a região de fluxo turbulento é dividida em duas regiões: uma zona de transição (Transition region) e uma zona de turbulência completa em tubos rugosos (Complete turbulence). A zona inferior é designada Tubos lisos (Smooth pipes) e vai até a linha pontilhada e a zona de turbulência completa está acima da linha pontilhada. Vemos que nesta região o fator de atrito depende muito pouco do número de Reynolds e mais da rugosidade relativa e isto se evidencia na equação de Colebrook-White, onde com grandes números de Reynolds o segundo termo da equação dentro do parêntese se aproxima de zero. Dessa forma vemos por essa equação que o fator de rugosidade depende somente do primeiro termo que é proporcional à rugosidade relativa e/D. Note que na zona de transição ambos R e e/D influenciam o valor do fator de atrito f.

Esse fator é calculado para o fluxo laminar pela equação F24: $f = \frac{64}{R}$.

A zona de fluxo situada entre a região laminar e a região turbulenta é chamada de região de fluxo crítico ou de transição. Esta região é dividida em três: zona laminar, zona crítica e zona de transição como já vimos.

Nas zonas de fluxo turbulento em tubos lisos o fator de atrito não é muito afetado pela rugosidade interna e o fator de atrito fica dependendo somente do número de Reynolds que segue a esta equação:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2log_{10}\left(\frac{2,51}{R\sqrt{f}}\right)(F26)$$

Na zona de fluxo turbulento o fluxo em tubos muito rugosos o fator de atrito fica menos dependente do número de Reynolds e fica dependendo mais da rugosidade e do diâmetro do tubo e neste caso podemos usar a equação:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2log_{10}\left(\frac{e}{3,7D}\right)(F27)$$

Nestas equações f é o fator de atrito de Darcy, *D* é o diâmetro interno do tubo e e a rugosidade do tubo em polegadas que damos na tabela T1 acima.

Na zona de transição o fator de atrito é calculado pela equação de Colebrook-White que vimos em 7.4.3 acima.

Nas tubulações de gás, como veremos, existe um fator chamado de fator de transmissão que mede a quantidade de gás que pode ser transportado em uma tubulação.

7.4.5. Equação Hazen-Williams

A fórmula de Hazen-Williams é uma fórmula empírica relacionando o fluxo de água em um tubo com as características físicas do tubo.

Esta fórmula é usada para o projeto dos sistemas de irrigação, de sistemas de proteção com sprinklers e nos sistemas de distribuição de água e tem a vantagem de ser independente do número de Reynolds, mas ela é somente válida para o cálculo de tubos de água. Outra desvantagem é que ela não considera a temperatura e a viscosidade da água. Esta equação é para o SI:

$$S = \frac{10,67Q^{1,85}}{C^{1,85}d^{4,87}} \text{ (F28)}$$

Onde:

S = Perda de carga em metros de coluna de água por metro de tubo.
Q = Fluxo em m^3/s.
d = Diâmetro interno do tubo em metros.
C = Coeficiente de rugosidade conforme tabela abaixo.

O fator *C* pode causar certa incerteza do resultado do cálculo e é baseado na experiência em tubulações de água e por isso ao projetar novas tubulações deve ser feita uma escolha criteriosa deste fator.

Por exemplo, devido ao efeito de proporcionalidade inversa desse fator se usarmos um valor de C=100 e de C=140, o resultado final pode ser uma perda de

pressão 46% menor. Existem diversas formas de apresentação desta fórmula que não vamos discutir aqui.

Para o USCS a fórmula de Hazen-Williams toma a seguinte forma:

$$P_d = \frac{4{,}52Q^{1{,}85}}{C^{1{,}85}d^{4{,}87}} \text{ (F29)}$$

Onde:

P_d= Perda de pressão em libras por polegada quadrada por pé (psi/ft).
Q = Fluxo em galões por minuto.
d = Diâmetro interno em polegadas

Fator C para a fórmula Hazen-Williams	
Material do tubo	Fator C
Tubos lisos (Qualquer metal)	130-140
Ferro fundido velho	100
Ferro desgastado/esburacado	60-80
PVC	150
Tijolos	100
Madeira lisa	120
Alvenaria lisa	120
Barro vitrificado	110

Para o SI essa equação é: $P_{km} = 1{,}1101 * 10^{13}\left(\frac{Q}{C}\right)^{1{,}852}\frac{S}{D^{4{,}87}}$

Onde:

P_{km}= Perda de carga em kPa/km
Q= Fluxo em m^3/h
S= Gravidade específica do líquido ou 1 para a água
C= Fator Hazen-Williams adimensional (Ver tabela acima)

7.4.6. Equação de Manning

Esta equação foi desenvolvida para ser usada em canais abertos com fluxo de água, mas é utilizada algumas vezes para o fluxo em tubulações fechadas. Ela também é conhecida como fórmula de Gauckler-Manning-Strickler e foi apresentada em 1867 pelo eng. Philippe Gauckler.

Uma forma desta fórmula usada para o cálculo das perdas de pressão em uma tubulação no sistema USCS é:

$$Q = \frac{1{,}486}{n}AR^{2/3}\left(\frac{h}{L}\right)^{1/2} \text{ (F30)}$$

Nessa fórmula temos os seguintes valores para o sistema USCS:

Q = taxa de fluxo, ft^3/s.
A = secção transversal do tubo ft^2.
R = raio hidráulico, D/4 para tubos redondos cheios.
n = índice Manning ou coeficiente de rugosidade sem dimensão.

D = diâmetro interno do tubo, ft.
h = perda por atrito, ft coluna de água.
L = comprimento de tubo, ft.

Para o sistema SI a fórmula é:

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} \left(\frac{h}{L}\right)^{1/2} \quad \text{(F31)}$$

Nessa fórmula temos:

Q = taxa de fluxo, m^3/s.
A = secção transversal do tubo m^2.
R = raio hidráulico, D/4 para tubos redondos cheios.
n = índice Manning ou coeficiente de rugosidade sem dimensão.
D = diâmetro interno do tubo, m.
h = perda por atrito, m coluna de água.
L = comprimento de tubo, m.

O raio hidráulico é uma medida da eficiência do canal de fluxo cuja velocidade depende da forma da secção transversal sendo o raio hidráulico a caracterização do canal. Este raio é calculado pela razão da secção transversal do canal *A* e seu perímetro molhado *P*, e é dado pela fórmula:

$$R_h = \frac{A}{P} \text{(F32)}$$

No sistema SI temos R_h em metros, *A* em m^2 e *P* em metros. Vemos que o raio hidráulico é uma função da forma do canal.

9. Nota final

Estudamos assim resumidamente as diversas equações usadas para o cálculo das tubulações. Essas equações serão usadas nas apostilas seguintes quando faremos exemplos práticos de utilização para cada um dos fluidos que serão estudados além de serem dados mais detalhes de seu uso conforme o tipo de fluido sendo transportado.

APÊNDICE I
Tabela de unidades e conversões
Sistema USCS e SI

Item	Unidades USCS	Unidades SI	Conversão USCS para SI	Conversão SI para USCS
Massa	Slug (slug)	Quilograma (kg)	1 lb=0,45359 kg	1 kg=0,0685 slug
	Libra massa (lbm)		1 slug=14,594 kg	1 kg=2,205 lb
	1 U.S. ton=2.000 lb	Tonelada métrica (t) = 1.000 kg	1 U.S. ton=0,9072 t	1 t= 1,1023 U.S. ton
	1 tonelada longa		1 long ton=1,016 t	1 t= 0,9842 long ton
Comprimento	Polegada (in)	Milímetro (mm)	1 in=25,4 mm	1 mm= 0,0394 in
	1 pé (ft) = 12 in	1 metro (m)= 1.000 mm	1 ft= 0,3048 m	1 m= 3,2808 ft
	1 milha (mi)= 5.280 ft	1 quilômetro (km)= 1.000 m	1 mi= 1,609 km	1 km= 0,6214 mi
Área	Pé quadrado (ft^2)	Metro quadrado (m^2)	1 ft2= 0,0929 m^2	1 m2= 10,764 ft^2
	1 acre=43.560 ft^2	1 hectare (ha)= 10.000 m^2	1 acre= 0,4047 hectares	1 ha= 2,4711 acre
Volume	Polegada cúbica (in^3)	Milímetro cúbico (mm^3)	1 in^3= 16387,0 mm^3	1 mm^3= 6,1*10^{-05} in^3
	Pé cúbico (ft^3)	1 litro (L) = 1.000 cm^3 (cc)	1 ft^3= 0,02832 m^3	1 m^3= 35,3134 ft3
	1 galão americano (Gal)=31 in^3	1 metro cúbico (m^3)=1.000 L	1 gal= 3,785 L	1L= 0,2642 gal
	1 barril (bbl) = 42 gal		1 bbl= 158,97 L=0,15897m^3	1 m^3=6,2905 bbl
	1 ft^3= 7,4805 gal 1 bbl= 5,6146 ft^3			
Densidade	Slug por pé cúbico (slug/ft^3)	Quilograma/metro cúbico (kg/m^3)	1 slug/ft^3=515,38 kg/m^3	1 kg/m^3=0,0019 slug/ft^3
Peso específico	Libra por pé cúbico (lb/ft^3)	Newton por metro cúbico (N/m^3)	1lb/ft^3= 157,09 N/m^3	1 N/m^3= 0,0064 lb/ft^3
Viscosidade (absoluta ou dinâmica)	lb/ft*s) (lb*s)ft^2	1 poise(P)= 0,1 Pa.s 1 centipoise (cP) = 0,01P 1 poise= 1 (dina*s)/m^2 1 poise= 0,1(N.m)/m^2	1 (lb*s)/ft^2=47,88 (N.s)/m^2 1 (lb*s)/ft^2= 478,8 poise	1 cP= 6,7197*10^{-4} lb/(fts) 1 (Ns)/m^2=0,0209(lbs)/ft^2 1 poise= 0,00209 (lb.s)/ft^2
Viscosidade (cinemática)	ft2/s SSU†,SSF†	M2/s Stoke (S), centistokes (cSt)	A ft2/s= 0,092903 m2/s	1 m2/s=10,7639 ft2/s 1 cSt= 1,076*10-5 ft2/s
Taxa de fluxo	Pé cúbico/segundo (ft^3/s) Galão/minuto (Gal/min) Barril/hora (bbl/h) Barril/dia (bbl/dia)	Litro/minuto (L/min) Metro cúbico/hora (m^3/h)	1 gal/min= 3,7854 L/min 1 bbl/h= 0,159 m^3/h	1 L/min=0,2642 gal/min m^3/h= 6,2905 bbl/h
Força	Libra (lb)	Newton (N)=(kg*m)/s^2	1 lb=4,4482N	1 N= 0,2248 lb

Pressão	Libra/polegada quadrada lb/in^3 (psi) 1 lb/ft^2= 144 psi	Pascal (Pa)= N/m^2 1 quilopascal (kPa) = 1.000 Pa 1 megapascal (MPa)= 1.000 kPa 1 bar= 100 Kpa Quilograma/centímetro quadrado (kg/cm^2)	1 psi= 6,895 kPa 1 psi= 0,069 bar 1 psi= 0,07303 kg/cm^3	1 kPa= 0,145 psi 1 bar= 14,5 psi 1 kg/cm^2= 14,22 psi
Velocidade	Pé/segundo (ft/s) Milha/hora (mi/h)= 1,4667 ft/s	Metro/segundo (m/s	1 ft/s= 0,3048 m/s	1 m/s= 3,281 ft/s
Trabalho e energia	Pé-libra (ft.lb) (Btu) Unidade térmica inglesa = 778 ft.lb	Joule (J)= N.m	1 Btu= 1055,0 J	1 kJ= 0, 9478 Btu
Força	(ft.lb)/min Btu/hora (Btu/h) Cavalo força (HP) 1 HP= 33.000 ft.lb)/min	Joule/segundo)J/s) Watt(W)= J/s 1 quilovate (kW)= 1.000 W	1 Btu/h= 0,2931 W 1 HP= 0,746 kW	1 W=3,4121 Btu 1 kW= 1,3405 HP
Temperatura	Grau Fahrenheit (°F) 1 grau Rankine (°R)= °F+460	Grau Celsius (°C) Kelvin (K)= °C+273	1 °F= 9/5°C+32 1 °R= 1,8K	1 °C=(°F-32)/1,8 1K= °R/1,8
Condutividade térmica	Btu(h.ft.°F)	W/(m.°C)	1 Btu/(h.ft.°F) = 1,7307 W/(cm.°C)	1 W/(m.°C)= 0,5778 Btu/(h.ft.°F)
Coeficiente de transmissão de calor	Btu/(h.ft^2.°F)	W/(m^2.°C)	1 Btu/(h.ft.°F)= 5,6781 W/(m^2.°C)	1 W/(m^2/°C)= 0,1761 Btu/(h.ft^2.°F)
Calor específico	Btu/(lb.°F)	kJ/(kg.°C)	1 Btu/)lb;°F)= 4,1869 kJ/kg.°C)	1 kJ/(kg.°C)= 0,2388 (Btu/(lb.°F)

Notas:

1. As viscosidades cinemáticas em SSU e SSF são convertidas em CST usando as equações encontradas na apostila das tubulações para sistemas de óleo: